

文章编号: 0258-7025(2009)04-0913-05

# 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制

朱晓亮 苑立波 刘志海 杨 军 关春颖

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 通过将单芯单模光纤与双芯单模光纤熔接后在熔点处进行熔融拉锥, 实现了单芯光纤到双芯光纤的功率耦合, 解决了由于双芯光纤特殊结构引起的与光源、单芯光纤等直接耦合及监测所存在的问题。对单芯单模光纤与双芯单模光纤的耦合理论进行了研究, 基于直接耦合理论与弱耦合理论建立了单芯单模光纤与双芯单模光纤的耦合方程, 并就影响耦合光功率的因素进行了讨论。结果表明该理论分析方法能够有效地描写单芯光纤与双芯光纤耦合过程中光波的行为特征。

**关键词** 光纤通信; 双芯光纤; 模场; 耦合方程

**中图分类号** TN229.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0913

## Coupling Approach and Mechanism of Single-Core and Twin-Core Fiber

Zhu Xiaoliang Yuan Libo Liu Zhihai Yang Jun Guan Chunying

(*Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

**Abstract** By fused biconical tapering at the fusion point of single mode single-core fiber and single mode twin-core fiber, a power tapered fiber coupling technique is implemented. The difficulties in direct-coupling with light source and single mode fiber and signal detection in the two cores due to its special structure are solved. The analysis about the coupling theory of single mode single-core fiber and single mode twin-core fiber is given. With the combination of direct-coupling and weakly coupled-mode theory, the coupling equations of single mode single-core fiber and single mode twin-core fiber are proposed. The factors which influence the coupling power are also discussed. This theory analysis can explain the coupling character effectively.

**Key words** optical communication; twin-core fiber; mode field; coupling equation

## 1 引 言

近年来微结构光纤的研究受到了人们的广泛关注<sup>[1~5]</sup>, 多芯光纤是一种同一包层中包含多个纤芯的特种光纤, 与常规光纤相比, 多芯光纤既可以作为光传输介质, 又可构造新器件, 如光纤开关与逻辑门、滤波器、锁模孤子激光器、均衡放大器、衰减器等, 因而常被用于光通信、光学元件<sup>[6~8]</sup>以及光学传感器<sup>[9~11]</sup>等领域。因此研究多芯光纤具有重要的理论和实际意义。

多芯光纤应用时的主要问题是多芯光纤中光信号的激励与探测问题。这是由于多芯光纤的紧凑结

构造成的: 多芯光纤纤芯尺寸小, 每个纤芯直径仅有几微米且分布在直径为 125  $\mu\text{m}$  的包层中; 各纤芯的相对距离——芯间距为纤芯半径的数十倍。这种结构使多芯光纤不可能与标准光纤直接进行连接耦合。为了解决这一问题, 国内外许多学者提出了多种连接耦合方法, 并对其特性进行了研究<sup>[12,13]</sup>。本文通过将单芯单模光纤与双芯单模光纤熔接后在熔点处进行熔融拉锥, 实现了单芯单模光纤与双芯单模光纤的耦合, 并建立了相应的耦合理论。这种技术是使用双芯光纤构成光学装置, 制作各种传感元件并应用的一个关键所在。

**收稿日期**: 2008-12-08; **收到修改稿日期**: 2008-12-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(60577005, 60707013, 60877046, 60807032)资助项目。

**作者简介**: 朱晓亮(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: zxl-2005-zxl@163.com

**导师简介**: 苑立波(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com

## 2 单芯光纤与双芯光纤的耦合模型

双芯光纤是一种同一包层中包含两个纤芯的特殊光纤,实验所用双芯光纤如图 1 所示。其外径为  $62.5 \mu\text{m}$ ,芯径均为  $3.7 \mu\text{m}$ ,两纤芯芯间距为  $62 \mu\text{m}$ 。单芯单模光纤与双芯光纤耦合的实验装置如图 2 所示。实验中使用了波长为  $0.67 \mu\text{m}$  的激光二极管(LD)作光源,显微镜与 CCD 置于双芯光纤纤端用于监测耦合过程中双芯光纤每一个纤芯出射的光功率。

单芯光纤和双芯光纤利用光纤熔接机(KL-260B)熔合,然后置于拉锥机上,此时 CCD 监测到两纤芯仅有很弱的散射光。接着进行加热拉锥,光纤锥逐渐形成,这个过程中传输光逐渐从单芯单模

光纤经过光纤锥后聚集到高介电常数的纤芯中。最终当融锥长度约为  $21.5 \text{ mm}$  时,CCD 探测功率达到最大值,泄露光功率最小。此后随着融锥长度增加,融锥区光纤越来越细,锥腰处光功率变为辐射模泄露得越来越多,双芯光纤耦合光功率逐渐减小。

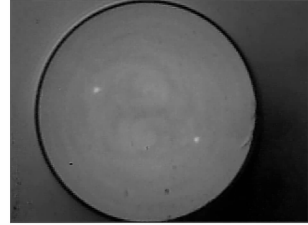


图 1 双芯单模光纤横截面

Fig. 1 Cross section of single mode twin-core fiber

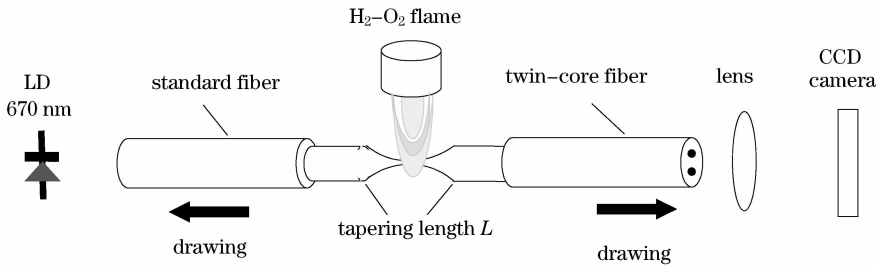


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

由于在耦合光功率达到最大值之前,光纤中的光功率主要为纤芯导模,因此对于单芯单模光纤到双芯单模光纤的耦合可基于直接耦合与弱耦合理论相结合的方法进行分析。

## 3 双芯光纤与单芯光纤的耦合理论

实验中光源发出的光经单芯单模光纤传输进入熔锥区时,随着纤芯不断变细,有越来越多的光进入双芯光纤纤芯中,入射光发生功率分配。同时,在双芯光纤一侧的熔锥区,由于两纤芯靠得足够近,光功率通过平行波导之间的耦合,部分光功率可互易地由一个纤芯转移到另一个纤芯,形成了耦合过程中两纤芯间光功率的起伏。

光纤熔锥区坐标系如图 3 所示,将文献[14]中方程(5)得出的熔拉光纤模场半径  $w_0$  代入单模光纤的基模场分布<sup>[15]</sup>

$$\psi_A(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp(-r^2/w_0^2), \quad (1)$$

可得到熔拉过程中单芯单模光纤的模场分布。其中  $r$  为光纤的径向坐标, $\psi$  为模场分布函数。

同理可得到双芯单模光纤芯 1,芯 2 对应的模

场分布。若以光纤纤芯为原点,设双芯光纤两纤芯到光纤中心的距离分别为  $d_1, d_2$ ,可得双芯光纤芯 1,芯 2 的模场分布函数  $\psi_{B1}, \psi_{B2}$

$$\psi_{B1} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_1} \exp\left[-\frac{(x-d_1)^2 + y^2}{w_1^2}\right], \quad (2)$$

$$\psi_{B2} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_2} \exp\left[-\frac{(x+d_2)^2 + y^2}{w_2^2}\right]. \quad (3)$$

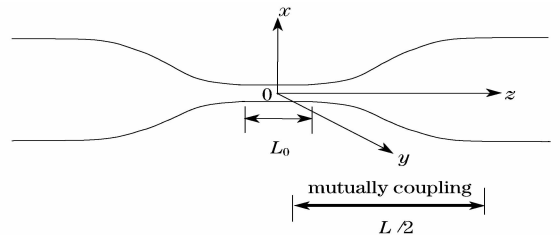


图 3 单芯光纤与双芯光纤熔接拉锥示意图

Fig. 3 Tapering at the sliced point of single-core fiber and twin-core fiber

如果光纤与波导之间是理想的对准,耦合的总插入损耗就包括菲涅耳反射损耗(两界面之间的多次反射)、传输损耗和光纤与波导间的模场失配损耗。此处,总插入损耗中模场失配损耗是主要因素,因为单芯光纤中光能量向双芯光纤的转移是通过两种光纤模场的匹配来完成的。

由单芯光纤的模场分布  $\psi_A$  (见(1)式)和双芯光纤模场分布  $\psi_{B1}, \psi_{B2}$  的重叠积分<sup>[16]</sup>可以计算出直接耦合进入双芯光纤两纤芯的耦合光功率  $P_{B1}, P_{B2}$

$$P_{B1} = P_1(0) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_A \psi_{B1}^* dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi_{B1}|^2 dx dy}, \quad (4)$$

$$P_{B2} = P_2(0) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_A \psi_{B2}^* dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi_{B2}|^2 dx dy}, \quad (5)$$

式中  $P_1(0), P_2(0)$  为两纤芯初始光功率。(4)式和(5)式中的自变量为单芯光纤纤芯半径,通常感兴趣的是耦合光功率与锥区长度之间的关系,因此需找到熔锥区长度  $L$  与单芯光纤纤芯半径  $a$  的关系式。

$$\begin{cases} P_1 = P_1(0) + F^2 \left\{ P_2(0) - P_1(0) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{C} [P_1(0)P_2(0)]^{1/2} \right\} \sin^2 \left( \frac{C}{F} \frac{L}{2} \right) \\ P_2 = P_2(0) + F^2 \left\{ P_1(0) - P_2(0) - \frac{\beta_1 - \beta_2}{C} [P_1(0)P_2(0)]^{1/2} \right\} \sin^2 \left( \frac{C}{F} \frac{L}{2} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\beta_1, \beta_2$  为两纤芯在孤立状态的纵向模传播常数;  $C$  为耦合系数,有  $C = \frac{3\pi\lambda}{32n_2' a'^2 (1+1/V)}$  (见文献

[19]中式(4.2.2)),其中  $V = ka' \sqrt{n_2'^2 - 1}$  是孤立光纤的光纤参量,  $n_2' = 1.4572$  为双芯光纤包层折射率,  $a'$  为双芯光纤纤芯半径。方程(7)即为单芯单模光纤与双芯单模光纤的耦合方程,  $P_1, P_2$  即为双芯光纤两纤芯的输出光功率。

## 4 影响耦合光功率的因素

由于实际双芯光纤与单芯光纤芯间距以及双芯光纤两纤芯折射率并不严格相等,因此对双芯光纤耦合光波的行为特征产生重要影响。

### 4.1 芯间距不对称

$d_1 \neq d_2$  即  $\Delta d = d_2 - d_1 \neq 0$  时,双芯光纤两纤芯与单芯光纤纤芯模场匹配不相等,从而引起直接耦合进入双芯光纤两纤芯中的光功率不等。取双芯光纤纤芯折射率为 1.4681,包层折射率为 1.4572,通过方程(4)和(5)可得双芯光纤直接耦合光功率与熔锥长度  $L$  的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可见:1)  $L < 15$  mm 时直接耦合光功率很小,接近于零,这是由于双芯光纤两纤芯离单芯光纤纤芯较远且模场半径较小,因而直接耦合进入双芯内的光较少造成的。此后,随着融锥长度  $L$  增

根据参考文献[17]中方程(15)可求出融锥长度  $L$  与单芯光纤纤芯半径  $a$  的关系为

$$L = [1 - 2 \times \ln(16.25a/62.5)] \times L_0, \quad (6)$$

其中  $L_0 = 4$  mm 为加热区初始宽度。将(6)式代入方程(4)和(5)可得到直接耦合光功率  $P_{B1}, P_{B2}$  与熔锥区长度  $L$  的关系。

随着融锥长度的增加,在熔锥区的双芯光纤一侧两纤芯充分靠近,两个基模通过倏逝波变为耦合模,功率可互易地由一个纤芯转移到另一个纤芯,形成弱耦合,从而会造成两纤芯内光功率呈周期震荡。在弱导和弱耦合近似下,忽略自耦合效应,并假设光纤是无吸收损耗的,由文献[18]中方程组(29-10)可得双芯光纤耦合区两纤芯中光功率  $P_1, P_2$  分别为

加,纤芯半径减小,模场半径增大<sup>[14]</sup>且双芯光纤与单芯光纤芯间距减小,因此直接耦合进入双芯光纤纤芯内的光明显增多。2)  $\Delta d = 0$  时,双芯光纤与单芯光纤模场交叠相等,故两纤芯直接耦合光功率曲线合为一条曲线。 $\Delta d$  越大,模场匹配差异越大,因此双芯光纤两纤芯曲线分开越大。

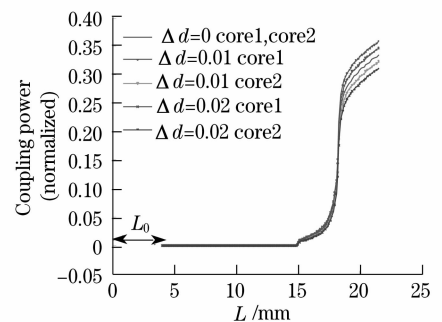


图 4  $\Delta d$  不同时  $P_{B1}, P_{B2}$  与  $L$  的关系

Fig. 4 Variation of  $P_{B1}, P_{B2}$  on  $L$  with different  $\Delta d$

### 4.2 纤芯折射率不同

由于实际使用的双芯光纤两纤芯折射率并不严格相等,故可设芯 2 折射率  $n_2'' = n_1' + \Delta n$ , 其中  $n_1' = 1.4681$  为芯 1 折射率。 $\Delta n$  不同,对耦合光波影响不同。

通过方程(4)和(5)可得  $\Delta d = 0, \Delta n$  不同时双芯光纤直接耦合光功率曲线,如图 5 所示。由图 5 可见:1)  $\Delta d = 0$  时,对应同一  $\Delta n$  双芯光纤两纤芯耦合

光功率均相等,耦合曲线合二为一;2) 对应不同  $\Delta n$ , 在  $L < 15$  mm 及  $L > 20.5$  mm 耦合区间内曲线相同, 这是由于  $L < 15$  mm 时双芯模场与单芯模场未匹配故耦合光功率近似为零;  $L > 20.5$  mm 时双芯模场与单芯模场完全交叠, 故耦合光功率相等。在  $15 \text{ mm} < L < 20.5 \text{ mm}$  区间内  $\Delta n$  越大, 模场交叠越大, 因此耦合光功率越大。

#### 4.3 芯间距与纤芯折射率均不同

$\Delta d, \Delta n$  均不为零时, 通过耦合方程(7)可得双芯光纤耦合光波的行为特征。 $\Delta d$  可通过电子显微镜测出为  $2 \mu\text{m}$ , 图6分别给出了  $\Delta d = 2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n =$

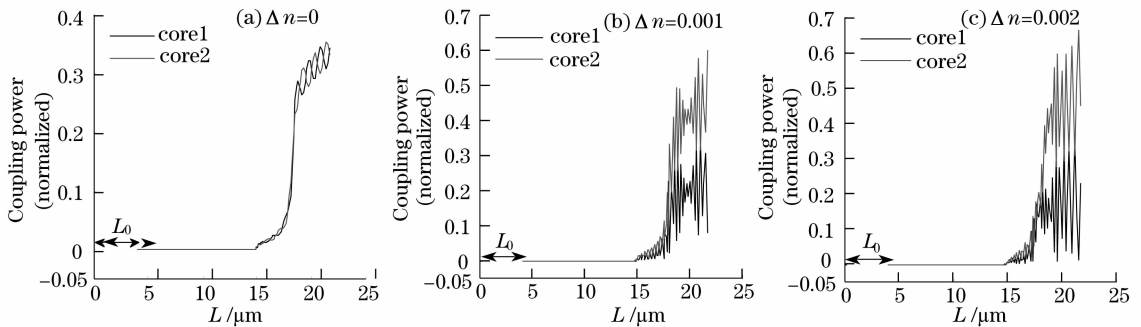


图6  $\Delta d = 2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n$  不同时双芯光纤耦合光功率曲线

Fig. 6 Coupling power variation in twin-core fiber with different  $\Delta n$  for  $\Delta d = 2 \mu\text{m}$

由图6可看出在同一  $\Delta d$  下,  $\Delta n$  不同时耦合光波的行为特征明显不同:  $\Delta n = 0$  时  $\beta_1 = \beta_2$ , 双芯光纤两纤芯内光波实现全耦合如图6(a)所示;  $\Delta n$  越大双芯光纤两纤芯内光波耦合越不完全, 耦合光功率曲线差异越大。通过与实验曲线对比(如图7所示)可知实验所用双芯光纤两纤芯折射率差约为0.1%, 该耦合理论分析方法能够有效地描写单芯光纤与双芯光纤耦合过程中光波的行为特征。

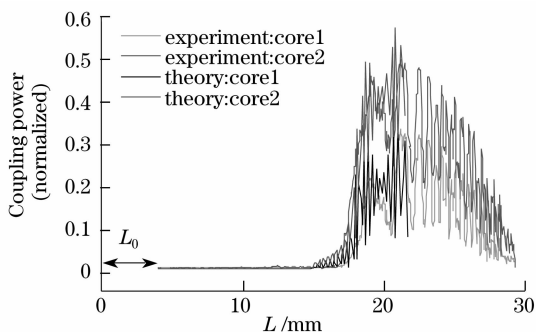


图7 理论计算与实验对比结果

Fig. 7 Comparison of theoretical prediction and experimental results

## 5 结 论

为了克服广泛用于光纤通信或光纤传感领域的

0, 0.001, 0.002 时双芯光纤耦合光波的特征曲线。

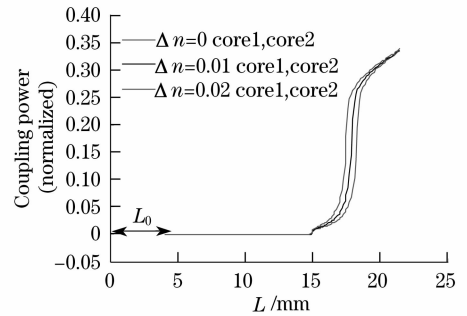


图5  $\Delta n$  不同时  $P_{B1}, P_{B2}$  与  $L$  的关系

Fig. 5 Variation of  $P_{B1}, P_{B2}$  on  $L$  with different  $\Delta n$

双芯光纤元件与光源、单芯光纤直接连接、耦合及监测所存在的问题, 通过将单芯单模光纤与双芯单模光纤熔接后在熔点处进行熔融拉锥的方法, 实现了单芯光纤到双芯光纤的功率耦合。该方法有利于将多芯光纤元件与标准单模光纤系统相连接, 适于光学集成。基于耦合理论建立了单芯单模光纤与双芯单模光纤的耦合方程, 结果表明该理论分析方法能够有效地描写单芯光纤与双芯光纤耦合过程中光波的行为特征, 证明了该理论分析方法的有效性。

## 参 考 文 献

- Wei Yanfen, Zhang Xia, Xu Yongzhao *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 414~418  
卫艳芬, 张霞, 徐永钊等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414~418
- Xu Yongzhao, Wang Zinan, Zhang Xia *et al.*. 10 GHz-spaced over 1100 channel flat supercontinuum source generated in a microstructure fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 675~679  
徐永钊, 王子南, 张霞等. 基于微结构光纤的10 GHz超过1100信道的平坦超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 675~679
- Wu Yanrong, Guo Lixia, Xue Wenrui *et al.*. Photonic crystal fiber with single polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 593~597  
武延荣, 郭丽霞, 薛文瑞等. 单偏振光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 593~597

- 4 W. N. MacPherson, J. D. C. Jones, B. J. Mangan *et al.*. Two-core photonic crystal fibre for Doppler difference velocimetry[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**: 375~380
- 5 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (12): 1603~1606  
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 6 C. Anne, Jacob Poulin, Real Vallee. Optical bandpass filter from a curved segment of a detuned two-core fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 5064~5071
- 7 M. Fokine, L. E. Nilsson, A. Claesson *et al.*. Integrated fiber Mach - Zehnder interferometer for electro-optic switching[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1643~1645
- 8 P. Glas, M. Naumann, A. Schirmacher *et al.*. The multicore fiber—a novel design for a diode pumped fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**: 187~195
- 9 P. M. Blanchard, J. G. Burnett, G. R. G. Erry *et al.*. Two-dimensional bend sensing with a single, multi-core optical fibre [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2000, **9**: 132~140
- 10 M. J. Gander, D. Macrae, E. A. C. Galliot *et al.*. Two-axis bend measurement using multicore optical fibre [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**: 115~121
- 11 Libo Yuan, Xue Wang. Four-beam single fiber optic interferometer and its sensing characteristics [J]. *Sensors and Actuators*, 2007, **138**(A): 9~15
- 12 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang *et al.*. Bitapered fiber coupling characteristics between single-mode single-core fiber and single-mode multicore fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3307~3312
- 13 S. B. Poole, J. D. Love. Single-core fiber to twin-core fiber connector[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(17): 1559~1560
- 14 Song Jun, Ming Hai. Mode field analysis of the pulled and etched single-mode step-index fiber [J]. *Optical Technology*, 2000, **26**(6): 563~564  
宋 军,明 海. 熔拉和腐蚀单模阶跃光纤的模场分析[J]. *光学技术*, 2000, **26**(6): 563~564
- 15 Zhou Shutong. *Fiber Theory and Measurement*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1988. 55  
周树同. *光纤理论与测量*[M]. 上海:复旦大学出版社, 1988. 55
- 16 Ma Huilian, Yang Jianyi, Li Jin *et al.*. Optical waveguide-fiber direct coupling [J]. *Study on Optical Communications*, 2000, (3): 43~47  
马慧莲,杨建义,李瑾等. 光波导-单横光纤的直接耦合[J]. *光通信研究*, 2000, (3): 43~47
- 17 Timothy A. Birks, Youwei W. Li. The shape of fiber tapers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 432~438
- 18 Allan W. Snyder, John D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London, New York, 1983. 568~572
- 19 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 113~114  
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 113~114